

Tauwasserschäden trotz Wärmebrückenberechnung

Helmut Marquardt
Hochschule 21, Harburger Str. 6, D-21614 Buxtehude
marquardt@hs21.de

Abstract

The ruin of a medieval church was reconstructed to an exhibition hall, air conditioned to $\theta_i = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\phi_i = 50$ to $55\text{ } \% \text{ R.H.}$ In spite of a successful calculation of the thermal bridges, vapour condensed at the skylights in winter. Thus water dropped down to the floor.

The above mentioned calculations of thermal bridges according to German standard *DIN 4108 Beiblatt 2* are simplifying the windows to wooden panels. By this means the opaque parts of the building envelope are free of condensation, but not the windows. More detailed calculations using the computer program THERM 5.2 demonstrate the reason of the condensation: Especially the glazing junction made of aluminium glass spacers is disadvantageous.

Zusammenfassung

Die Reste einer mittelalterlichen Kirche wurden als Ausstellungshalle wiederaufgebaut, die ganzjährig auf $\theta_i = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\phi_i = 45$ bis $55\text{ } \% \text{ r.F.}$ klimatisiert wird. Im ersten Winter tropft – trotz erfolgreicher Wärmebrückenberechnung – von den Oberlichtern Tauwasser ab.

Solche Wärmebrückenberechnungen mit den Randbedingungen gemäß Beiblatt 2 zu DIN 4108 setzen Fenster vereinfacht als „Brett“ an, so dass zwar die opaken Außenbauteile, nicht aber die Fenster tauwasserfrei bleiben. Aufwändigere Berechnungen mit detailliert elementierten Fenstern (mit Hilfe des EDV-Programms THERM 5.2) zeigen die Ursache des Tauwasser-ausfalls auf – v.a. der Aluminium-Randverbund der Verglasung wirkt sich hier ungünstig aus.



Bild 1: Blick über die Oberlichter bestehend aus wärme-gedämmten Stahlfenstern mit Wärmeschutzverglasung (Stufenverglasung)



Bild 2: Blick von unten zu den Oberlichtern über der zu einer Ausstellungshalle umgebauten mittel-alterliche Kirche

1. Problemstellung

Eine mittelalterliche Kirchenruine wurde zu einer Ausstellungshalle umgebaut, die ganzjährig auf $\theta_i = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\phi_i = 45$ bis $55\text{ } \% r.F.$ klimatisiert wird. Im ersten Winter tropft – trotz erfolgreicher Wärmebrückenberechnung – von den Oberlichtern Tauwasser ab (Bilder 1 bis 3).



Bild 3: Spuren des von einem Oberlicht abtropfenden Tauwassers auf dem Magnesia-Estrich der Ausstellungshalle

2. Ursache

2.1. Zweck und Randbedingungen der folgenden Berechnungen

Für die wichtigsten Details lagen bereits Ergebnisse von Wärmebrückenberechnungen aus der Planungsphase vor; leider waren die Randbedingungen dieser Berechnungen nicht vollständig dokumentiert. Die dort aufgeführten Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass eine genauere Berechnung zu ungünstigeren Ergebnissen führen wird.

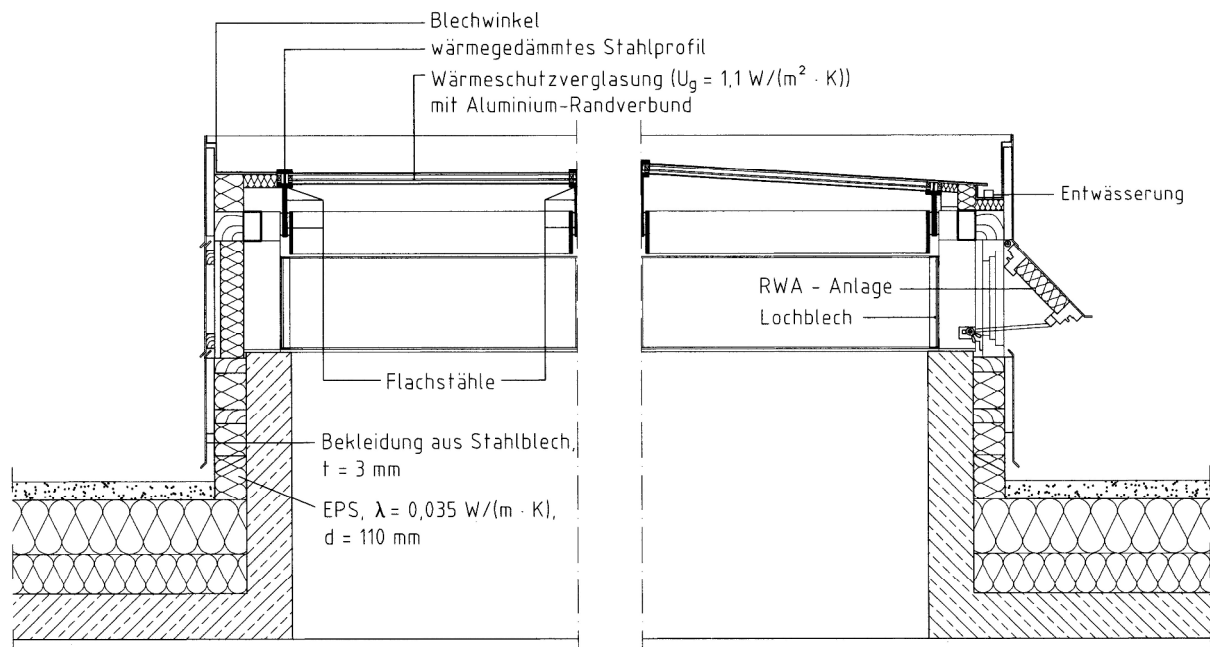


Bild 4: Querschnitt (links) und Längsschnitt (rechts) durch ein Oberlicht [1]

Deshalb wurden die Oberlichter (Bild 4) mit dem für die vorliegende Problematik besonders geeigneten Wärmebrückenprogramm THERM 5.2 [2] erneut berechnet; und zwar mit Randbedingungen, die so weit wie möglich DIN 4108-2 mit Beiblatt 2 [3], DIN EN ISO 10211 [4] und DIN EN ISO 10077 [5] folgen.

Tabelle 1: Randbedingungen für Oberflächentemperaturberechnung nach DIN 4108-2 [3]

Kenngröße	Randbedingung
Temperatur der Außenluft	$\theta_e = -5\text{ °C}$
Temperatur beheizter Räume	$\theta_i = +20\text{ °C}$
Wärmeübergangswiderstand außen	$R_{se} = 0,04\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}^1)$
Wärmeübergangswiderstand innen in beheizten Räumen	$R_{si} = 0,25\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}^1)$
Wärmeübergangswiderstand innen im Bereich der Fenster	$R_{si} = 0,13\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}^1)$

¹⁾ entspricht auch DIN EN ISO 13788 [6], Tabelle 2

Die Temperaturen und Wärmeübergangswiderstände wurden entsprechend DIN 4108-2 angesetzt (Tabelle 1). Für die lüftungstechnisch bedingten Wärmebrücken im Bereich von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA-Anlagen) in den Oberlichtern, die durch Lochblech mit dem Innenraum verbunden sind (vgl. Bild 4), muss jedoch der raumseitige Wärmeübergangswiderstand mit Hilfe der Fachliteratur [7, 8] abgeschätzt werden:

- in Raumecken: $R_{si} = 0,20\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- bei Gardinen vor einer Wand: $R_{si} = 0,25\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- bei freistehenden Schränken vor einer Wand: $R_{si} = 0,50\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- bei Einbauschränken: $R_{si} = 1,00\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Da sich der Hohlraum für die RWA-Anlage ungünstiger als Gardinen vor einer Wand, aber günstiger als ein Einbauschränk verhält, wird hierfür $R_{si} = 0,50\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ angenommen.

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit werden i.d.R. aus DIN V 4108-4 [3] bzw. DIN EN 12524 [9] entnommen. Ausnahmen:

- Die Fensterdichtungen aus EPDM werden mit $\lambda = 0,25\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ aus DIN EN ISO 10077-2 [5] berechnet.
- Die vorhandene Wärmeschutzverglasung wird gemäß DIN EN ISO 10077 [5] in der Art vereinfacht, dass für die Edelgasfüllung eine so geringe Wärmeleitfähigkeit λ angenommen wird, dass die Verglasung den in den Planunterlagen angegebenen Wärmedurchgangskoeffizienten $U_g = 1,1\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ erreicht.
- Für den Randverbund der Verglasung wurden Abstandhalter aus Aluminium mit Butyl- und Polysulfiddichtstoff angenommen (Abweichungen s.u.).

2.2. Kriterien für die Beurteilung der Berechnungsergebnisse

Zur Bewertung des Risikos von Tauwasserbildung an Fensterrahmen heißt es im informativen Anhang D von DIN EN ISO 13788 [6]

- zum einen, dass Tauwasserbildung auf der Innenseite von Fensterrahmen unerwünscht ist, wenn das Wasser in angrenzende Wandbekleidungen laufen kann,
- zum anderen, dass Tauwasser Korrosion in Metallrahmen oder Fäule in Holzrahmen hervorrufen kann, wenn es z.B. durch Fugen zwischen Rahmen und Verglasung eindringt.

Auf Grund der undurchlässigen Oberflächenbehandlung kommt an Fensterrahmen ein Pilzbefall jedoch selten vor; deshalb beträgt die höchste zulässige relative Luftfeuchte an der Rahmenoberfläche $\phi_s \equiv 100\text{ %}$, was dem Ausfall von Oberflächentauwasser entspricht. Damit ist zu rechnen, wenn die Taupunkttemperatur nach DIN 4108-3 [3], Tabelle A.4, unterschritten wird. Unter den ganzjährig konstanten Randbedingungen der Klimatisierung auf

- Raumtemperatur $\theta_i = 20\text{ °C}$ und
- Raumluftfeuchte $\phi_i = (45\text{ bis } 55\text{ % r.F.})$ (höherer Wert angesetzt, sichere Seite)

ist dies der Fall bei einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur $\theta_s = 10,7\text{ °C}$.

Erhorn u.a. haben allerdings bereits bei fünf- bis sechswöchiger gleichmäßiger Klimatisierung bei Raumtemperatur und relativer Luftfeuchte $\phi = 80 \%$ – abhängig vom Material der Bauteiloberfläche – Schimmelpilzbildung beobachtet [10, 11]. Deshalb fordert DIN 4108-2 [3] als Maßnahme zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung, dass für von DIN 4108 Beiblatt 2 abweichende Konstruktionen der Temperaturfaktor an der ungünstigsten Stelle die Mindestanforderung $f_{Rsi} \geq 0,70$ erfüllen muss, d.h., bei Norm-Randbedingungen $\phi_i = 50 \%$ r.F. ist eine raumseitige Oberflächentemperatur von $\theta_{si} \geq 12,6 \text{ °C}$ einzuhalten – Fenster sind allerdings davon ausgenommen. Der Grund liegt darin, dass Fenster, die regelmäßig gereinigt werden, Schimmelpilzen kein ausreichendes Nährstoffangebot bieten.

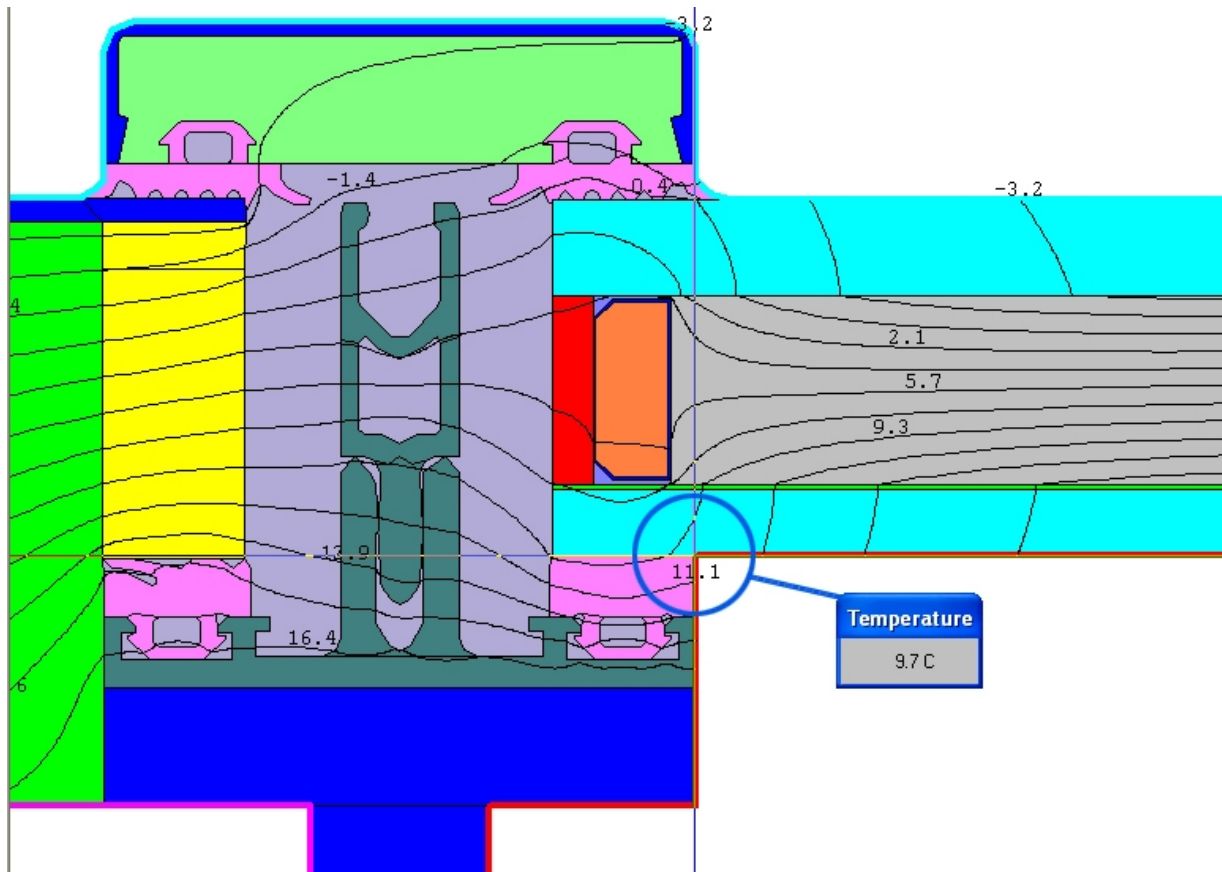


Bild 5: Screenshot (Isothermendarstellung) einer Wärmebrückenberechnung mit dem Programm THERM 5.2 [2] für den Randanschluss der Oberlichtverglasung (rechts) an die thermisch getrennte Metallkonstruktion (links) [1]

2.3. Rechnerische Überprüfung des Tauwasserausfalls

Beispielhaft sei das Berechnungsergebnis für die ungünstigste Stelle, den Randanschluss der Oberlichtverglasung, in Bild 5 dargestellt (vgl. Bild 2). Mit Tauwasserausfall ist zu rechnen bei einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur $\theta_s = 10,7 \text{ °C}$ (vgl. Abschnitt 2.2). Diese Taupunkttemperatur wird an dieser Stelle um $\Delta\theta = 10,7 - 9,7 = 1,0 \text{ K}$ unterschritten.

Diese Unterschreitung ist rechnerisch nicht sehr hoch – unberücksichtigt musste dabei jedoch bleiben, dass die Klimatisierung in 1,50 m Höhe eingeregelt wird und in Höhe der Oberlichter mit höherer relativer Luftfeuchte gerechnet werden muss. Bei den hier vorliegenden Oberlichtern, die nicht regelmäßig gereinigt werden können, sollte im Übrigen zur sicheren Vermeidung von Schimmelbildung bei der o.g. Randbedingung $\phi_i = 55 \%$ r.F. als Mindesttemperatur $\theta_{si,min} = 14 \text{ °C}$ angestrebt werden (vgl. Abschnitt 2.2).

2.4. Zusammenfassende Beurteilung der vorgefundenen Tauwasserschäden

Wärmebrückenberechnungen mit den Randbedingungen gemäß Beiblatt 2 zu DIN 4108 [3] setzen Fenster – Rahmen einschließlich Verglasung – vereinfacht als „Brett“ an, so dass zwar die opaken Bauteile der thermischen Hülle, nicht aber die Fenster tauwasserfrei bleiben. Aufwändigere Berechnungen mit detailliert elementierten Fenstern (mit Hilfe des EDV-Programms THERM 5.2) zeigen die Ursache des Tauwasserausfalls auf – v.a. der Aluminium-Randverbund der Verglasung wirkt sich hier ungünstig aus.

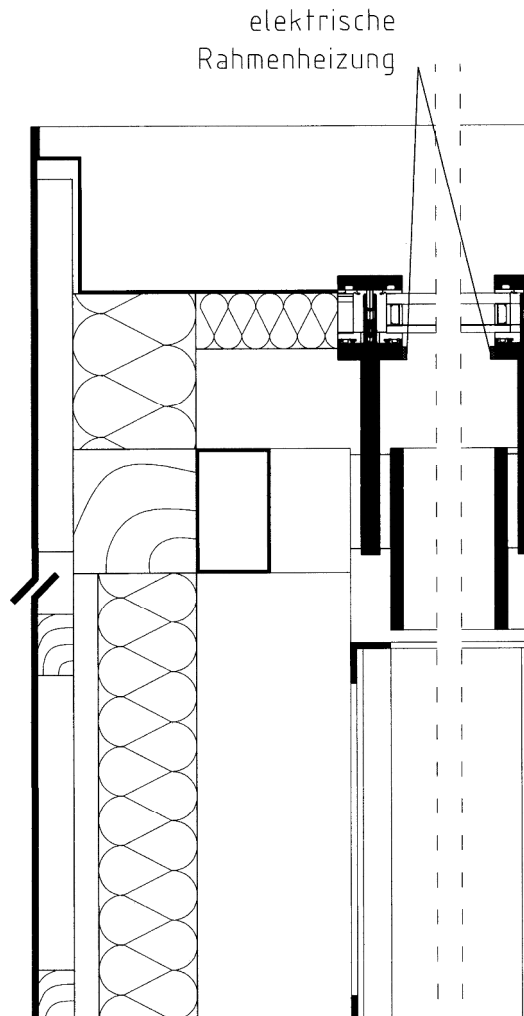


Bild 6: Querschnitt durch ein Oberlicht (vgl. Bild 4), Detail mit Anordnung einer elektrischen Rahmenheizung am Randanschluss (links) und am Fensterkreuz (rechts) [1]

3. Schadensbehebung

3.1. Möglichkeiten der Schadensbehebung

Zur künftigen Verhinderung der Bildung von Oberflächentauwasser werden die folgenden Möglichkeiten näher untersucht:

- Ersatz der vorhandenen Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit Aluminium-Abstandhaltern ($\lambda = 160 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) durch eine Verglasung mit verbessertem Randverbund (d.h. Abstandhalter aus Edelstahl mit $\lambda = 17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bzw. aus Kunststoff) oder
- Einbau einer elektrischen Rahmenheizung in tauwassergefährdeten Bereichen der Oberlichter; d.h. möglichst nahe den Bereichen mit Tauwasserausfall werden elektrische Widerstandsdrähte oder -folien auf die Metallkonstruktion aufgeklebt (Bild 6), so dass bei entsprechender Beheizung kein Tauwasserausfall mehr zu erwarten ist.

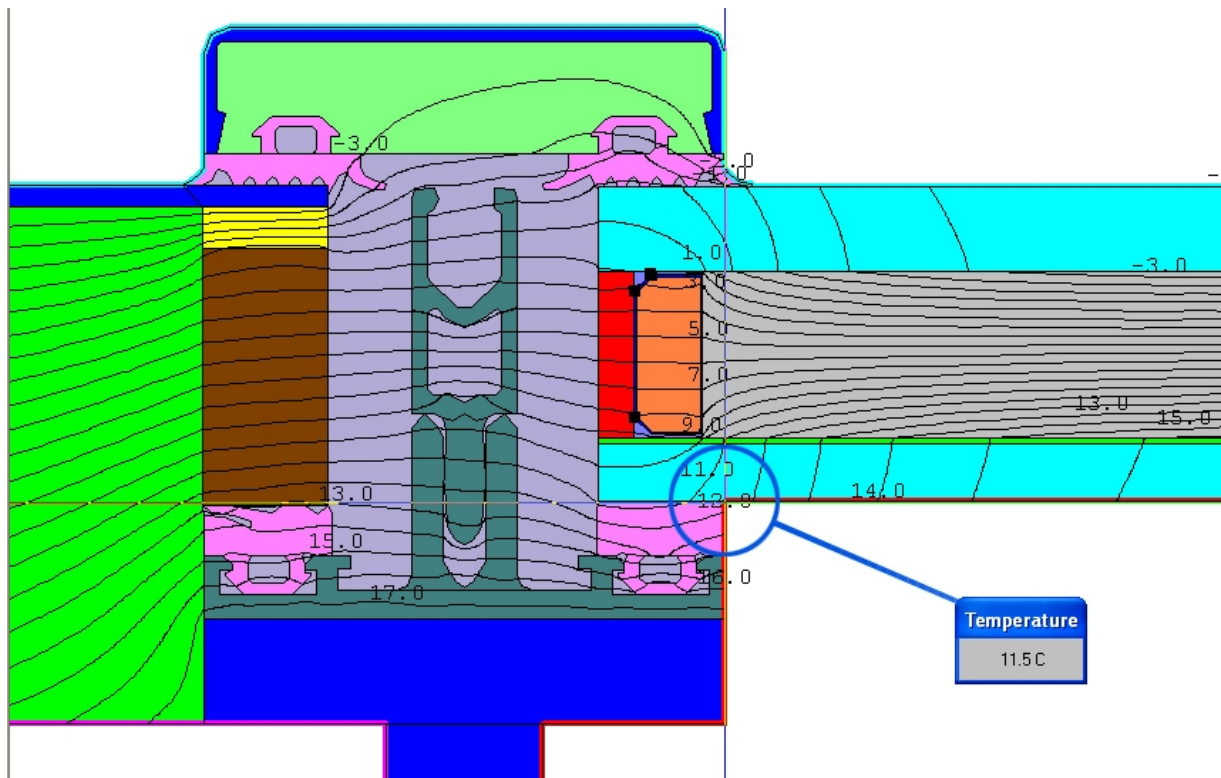


Bild 7: Screenshot (Isothermendarstellung) einer Wärmebrückenberechnung mit dem Programm THERM 5.2 [2] für den Randanschluss der Oberlichtverglasung (rechts) an die thermisch getrennte Metallkonstruktion (links) – hier bei Verwendung eines *verbesserten Randverbundes aus Edelstahl* [1]

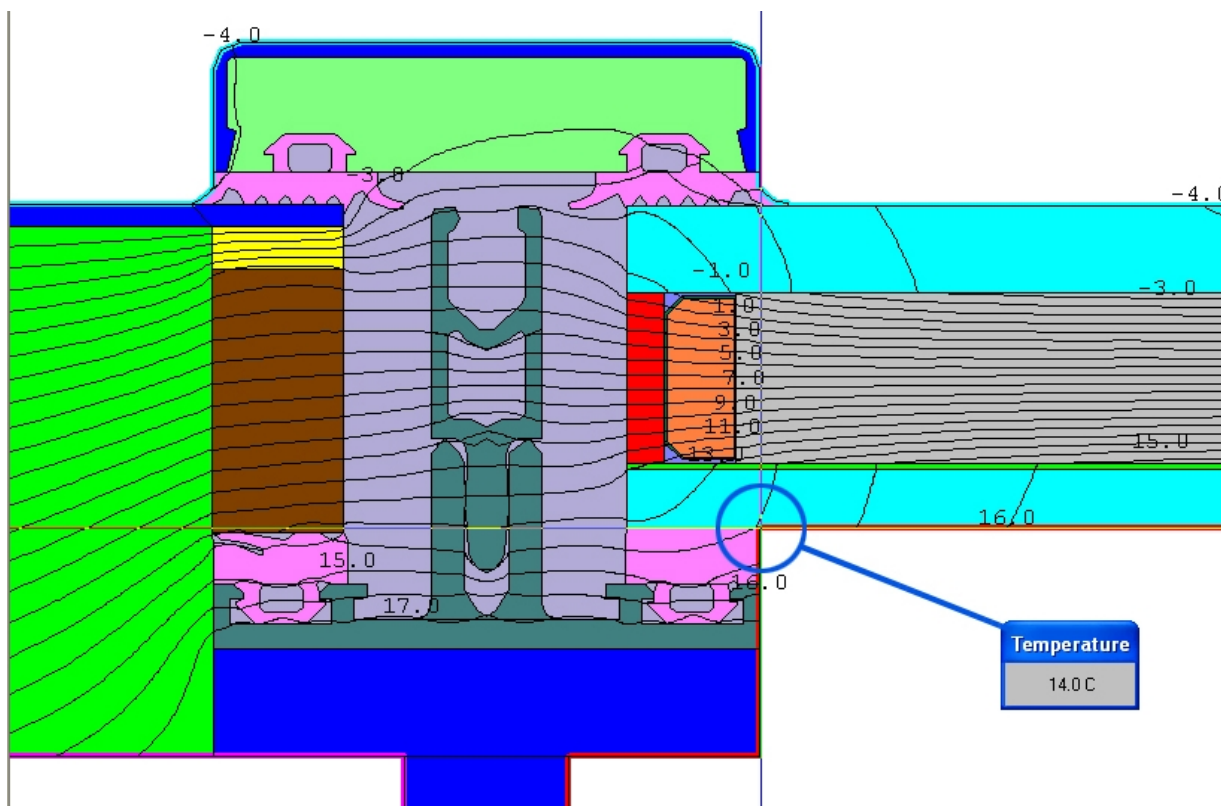


Bild 8: Screenshot (Isothermendarstellung) einer Wärmebrückenberechnung mit dem Programm THERM 5.2 [2] für den Randanschluss der Oberlichtverglasung (rechts) an die thermisch getrennte Metallkonstruktion (links) – hier bei Verwendung eines *verbesserten Randverbundes aus Kunststoff* [1]

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit werden wiederum DIN V 4108-4 [3] bzw. DIN EN 12524 [9] entnommen. In Anlehnung an [12] wurde allerdings berücksichtigt, dass bei den üblichen Kunststoff-Abstandhaltern des Fabrikats *Thermix* eine 0,1 mm dicke Aluminium-Folie eingebettet ist – es wurde deshalb mit $\lambda = 0,40 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ gerechnet.

3.2. Rechnerische Überprüfung des Tauwasserausfalls

Für die Berechnungen werden die gleichen Randbedingungen wie in Abschnitt 2.1 angesetzt. Die Berechnungsergebnisse für den Randanschluss der Oberlichtverglasung mit Ersatz der Aluminium-Abstandhalter durch solche aus Edelstahl bzw. Kunststoff in den Bildern 7 und 8 dargestellt. Mit Tauwasserausfall ist entsprechend Abschnitt 2.2 zu rechnen, wenn die Taupunkttemperatur unterschritten wird, d.h. bei einer Unterschreitung von $\theta_s = 10,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Der Ersatz der Aluminium-Abstandhalter führt im Vergleich zu Bild 5 zu einer deutlichen Erhöhung der minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen $\theta_{si,min}$, und zwar

- bei Edelstahl-Abstandhaltern von $\theta_{si,min,0} = 9,7 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $\theta_{si,min,1} = 11,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw.
- bei Kunststoff-Abstandhaltern von $\theta_{si,min,0} = 9,7 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $\theta_{si,min,1} = 14,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

D.h. bereits bei Verwendung von *Edelstahl*-Abstandhaltern wird die Taupunkttemperatur $\theta_s = 10,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (vgl. Abschnitt 2.2) überschritten, bei Verwendung der *Kunststoff*-Abstandhalter sogar die am Ende von Abschnitt 2.3 empfohlene Mindesttemperatur $\theta_{si,min} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eine elektrische Rahmenheizung kann im Programm THERM 5.2 [2] nicht direkt eingegeben werden. Behelfsweise wird deshalb angenommen, dass das T-Profil aus Stahl direkt unter den Profilen der Oberlichter von der raumseitigen Oberfläche aus beheizt wird (vgl. Bild 6). Dazu wird dort als Randbedingung angesetzt

- eine variable Raumlufttemperatur = Temperatur der Rahmenheizung von $\theta_{RH} = 40$ bis $100 \text{ }^\circ\text{C}$ mit
- einem Wärmeübergangswiderstand von $R_{si} = 0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, was ein vollflächiges Aufkleben der Rahmenheizung mit einem gut wärmeleitenden Klebstoff simulieren soll.

Die in DIN EN ISO 10211 [4] geforderte Rechengenauigkeit (Abbruchschranke) von 2 % konnte nur bei einer Temperatur der Rahmenheizung von $40 \text{ }^\circ\text{C}$ eingehalten werden; bei höheren Temperaturen der Rahmenheizung musste sie auf bis zu 4 % heraufgesetzt werden [1]. Die niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperaturen der Konstruktion mit unveränderten Aluminium-Abstandhaltern, jedoch mit elektrischer Rahmenheizung finden sich in Tabelle 2.

Rahmenheizung beheizt auf	niedrigste Oberflächentemperatur
$\theta_{RH} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{si,min} = 12,2 \text{ }^\circ\text{C}$
$\theta_{RH} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{si,min} = 14,0 \text{ }^\circ\text{C}$
$\theta_{RH} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{si,min} = 16,3 \text{ }^\circ\text{C}$
$\theta_{RH} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{si,min} = 18,3 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabelle 2: Niedrigste raumseitige Oberflächentemperatur der Konstruktion mit Aluminium-Abstandhaltern, jedoch mit elektrischer Rahmenheizung

Es zeigt sich, dass die Taupunkttemperatur schon bei einer Rahmenbeheizung auf $\theta_{RH} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ überschritten wird. Wird gemäß Abschnitt 2.3 eine Mindesttemperatur von $\theta_{si,min} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ angestrebt, so muss die Rahmenheizung unter Normbedingungen mit $\theta_{RH} \geq 60 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben werden. Da die vorliegenden Berechnungen von bestimmten, nicht sicheren Randbedingungen ausgehen (Außentemperatur $\theta_{se} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ nach DIN 4108-2 [3], keine Berücksichtigung punktförmiger Wärmebrücken im Bereich der Befestigung der Rahmenprofile), wird empfohlen, die Rahmenheizung leicht regelbar und mit nicht zu knapp bemessener Leistung auszulegen; sie sollte im Betrieb langsam auf die notwendige Mindestleistung gebracht werden – auch um Glasbruch infolge zu großer Temperaturdifferenzen in den Scheiben zu vermeiden.

3.3. Gewählte Lösung

Da während des über den folgenden Winter laufenden Ausstellungsbetriebs

- zum einen erneute Tauwasserbildung sicher ausgeschlossen werden sollte,
 - zum anderen aufwändige, witterungsabhängige Baumaßnahmen nicht möglich waren,
- wurde eine elektrische Rahmenheizung eingebaut (vgl. Bild 6).

4. Literatur

- [1] Marquardt, H.; Gercke, A.: *Abtropfendes Tauwasser trotz Wärmebrückennachweis*. In: Venzmer, H. (Hrsg.): *Europäischer Sanierungskalender 2007*. Berlin: Beuth 2006.
- [2] *EDV-Programm THERM Version 5.2* (mit allen aktuellen Updates). Berkeley/CA: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) 2005.
- [3] DIN 4108-2 : 2003-07: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*.
DIN 4108-3 : 2001-07 (mit Berichtigungen 2002-04): *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*.
DIN V 4108-4: 2004-07: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*.
Beiblatt 2 zu DIN 4108 : 2004-01: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Wärmebrücken; Planungs- und Ausführungsbeispiele*.
- [4] DIN EN ISO 10211-1 : 1995-11: *Wärmebrücken im Hochbau; Wärmeströme und Oberflächentemperaturen; Allgemeine Berechnungsverfahren*.
DIN EN ISO 10211-2 : 2001-06: *Wärmebrücken im Hochbau; Berechnung der Wärmeströme und Oberflächentemperaturen; Linienförmige Wärmebrücken*.
- [5] DIN EN ISO 10077-1 : 2000-11: *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen; Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten; Vereinfachtes Verfahren*.
DIN EN ISO 10077-2 : 2003-12: *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen; Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten; Numerisches Verfahren für Rahmen*.
- [6] DIN EN ISO 13788 : 2001-11: *Wärme- und feuchtechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinnern; Berechnungsverfahren*.
- [7] Erhorn, H.; Szerman, M.; Rath, J.: *Wärme- und Feuchteübertragungskoeffizienten in Außenwandoecken*. Das Bauzentrum (1992), H. 3, S. 145 – 146.
- [8] Hohmann, R.: *Materialtechnische Tabellen*. In: Cziesielski, E. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 5* (2005), S. 155 – 245. Berlin: Ernst & Sohn 2005.
- [9] DIN EN 12524 : 2000-07: *Baustoffe und -produkte; Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften; Tabellierte Bemessungswerte*.
- [10] Erhorn, H.: *Bauphysikalische Einflußfaktoren auf das Schimmelpilzwachstum in Wohnungen*. In: Schild, E.; Oswald, R. (Hrsg.): *Wärmeschutz, Wärmebrücken, Schimmelpilz – Aachener Bausachverständigentage 1992*. Wiesbaden: Bauverlag 1992, S. 73 ff.
- [11] Gertis, K.; Erhorn, H.; Reiß, J.: *Klimawirkungen und Schimmelpilzbildung bei sanierten Gebäuden*. In: *Bauphysik der Außenwände. Tagungsband zum Internationalen Bauphysikkongreß Berlin 1997*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 1997, S. 241 – 253.
- [12] Kaufmann, B.: *Wärmebrückenberechnung zur Zertifizierung von Fensterrahmen als Passivhaus geeignete Komponente*. Prüfbericht im Auftrag des Ingenieurbüros A. Naumann und H. Stahr, Leipzig. Darmstadt: Passivhaus Institut, April 2002.